

저치환율 SCP 복합지반의 2차원 유한요소 해석기법 개발과 적용 Two Dimensional Finite Element Analysis on the Composite Ground Improved by Sand Compaction Piles with Low Area Replacement Ratio

신현영¹⁾, Hyun-Young Shin, 한상재²⁾, Sang-Jae Han, 김수삼³⁾, Soo-Sam Kim, 김재권⁴⁾, Jae-Kwon Kim, 심성현⁵⁾, Sung-Hyun, Sym

¹⁾ (주)지구환경전문가그룹 기술연구소 연구원, Researcher, Institute of Expert Group for Earth & Environment

²⁾ 한양대학교 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Hanyang Univ.

³⁾ 한양대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Hanyang Univ..

⁴⁾ (주)삼성물산 건설부문 토목기술팀 상무, Manager Director, Civil Division, Samsung Corporation

⁵⁾ (주)삼성물산 건설부문 토목기술팀 차장, Vice Chief, Civil Division, Samsung Corporation

SYNOPSIS : This study developed two dimensional finite element program(FE-SCP) for the analysis of a composite ground reinforced by sand compaction piles with a low area replacement ratio based on the Mohr-Coulomb elastic perfectly plastic constitutive model. Program FE-SCP give some conveniences to users such as automatic mesh generation according to the replacement ratio and the effective sand pile diameter in the post processor. Also, it contains optimum processor in calculation of In-situ stress equilibrium considering different coefficient of earth pressure between sand pile and surrounding clay. Estimated stress-strain behavior using FE-SCP and the measured one from a centrifuge test showed good agreement comparing to the result from a general finite element program.

Key words : Sand compaction pile, 2-D finite element analysis, Centrifuge test, Mohr-Coulomb criteria

1. 서론

다양한 범용 수치해석 프로그램을 응용하여 SCP 복합지반의 거동 해석을 수행하고 있으며 특히, 설계 분야에서는 수치해석 결과를 이용하여 하중전이 파라미터와 침하저감효과 등을 고려하여 적용한다. 따라서 해석의 신뢰성이 중요성을 띠는다고 하겠다. 기존 범용 수치해석 프로그램들은 연속체 역학의 범주 내에서 지반을 모델링하고 고유의 구성모델을 이용한 해석결과를 제시하고는 있으나, 특수한 해석의

범주에 속하는 치환율 SCP 복합지반의 해석에 대해서는 실험 및 실측결과와 상당한 차이가 발생하고 있는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 그 이유는 복합지반의 경우 SCP와 점토가 연직방향으로 혼재하고 있으므로 이에 따라 재료특성과 경계조건이 과도하게 변화되는 재료 경계면에서의 변위 보정 과정에서 발생하는 수치적인 오류가 클 뿐만 아니라, 실제 복합지반 내부에서 발생하는 SCP와 점토부의 응력의 상호작용을 고려할 수 없기 때문이다. 이러한 이유로 SCP 개량구간을 개별적으로 모델링하지 않고 하나의 새로운 지층으로 구성하는 복합지반 해석기법을 주로 이용하여 왔으나, 치환율에 따른 복합지반 파라미터의 산정이 난해함을 비롯하여 해석 결과로부터 설계의 중요한 파라미터인 하중전이 특성을 파악할 수 없어 적용상의 한계점이 도출되고 있다. 따라서 본 연구에서는 SCP 복합지반의 효과적인 해석을 위해 SCP와 점토부에 대한 개별해석을 기본으로 하여, 이질 재료의 경계면에서 발생하는 초기 응력평형상태를 보정하고 SCP와 점토부의 상호응력작용을 고려하기 위해 각각 상이한 토압계수를 적용할 수 있는 형태의 2차원 유한요소 프로그램 FE-SCP를 개발하였다. FE-SCP를 이용한 해석 결과는 제한된 원심모형시험 결과와 비교하여 적용성을 검토하였다.

2. 프로그램(FE-SCP) 개요

본 연구에서 개발한 프로그램 FE-SCP는 기존의 2차원 유한요소 해석 프로그램이 가지고 있는 기본적인 기능에 추가하여, SCP 공법 적용지반의 거동을 최적화하여 해석하기 위해 다음과 같은 차별적인 기능을 부여하였다: ① 치환율과 SCP에 대한 2차원 평면변형률 환산단면적을 고려한 개량영역 요소의 자동 생성, ② Mohr-Coulomb 파괴기준에 근거한 모델 파라미터 산정, ③ 토압계수(K_0 , K_a , K_p)의 차등 적용을 통한 SCP와 주변지반의 응력평형상태 고려, ④ 최대 침하량과 최대 횡변위 발생지점을 자동 추적하여 하중전이 파라미터의 극한값 자동 산정, ⑤ 단계별 전단응력비(τ_{max}/τ)의 등시선 도시를 통해 안정성 검토를 위한 가시적인 기준 제시, ⑥ 해상수위 표현. 또한 프로그램은 해석의 신뢰성은 물론 사용자의 접근성에 대한 편의를 동시에 고려하였다.

실제 3차원의 문제에 대한 2차원 평면변형률로의 적용을 위해서는 그림 1과 같이 SCP의 직경을 환산할 필요가 있다. 본 연구에서는 면적 일치 개념을 도입하여 실제 SCP의 직경 d 와 치환율 a_s 로부터 환산직경 r 을 결정하기 위해 식(1)을 유도하였으며, 이로부터 개량영역의 자동 요소분할이 가능하도록 프로그램을 구성하였다. 그림 2는 치환율에 따른 환산직경의 변화를 도시한 것이다. 평면변형률 조건에서 SCP의 환산직경은 실제 SCP의 직경보다 항상 다소 작은 값을 갖게 되는데, 이로부터 2차원 수치해석에서 일반적으로 발생하는 SCP 강성의 과다평가 경향을 보완하였다.

$$r = \frac{d}{2} \sqrt{a_s \pi} \quad (1)$$

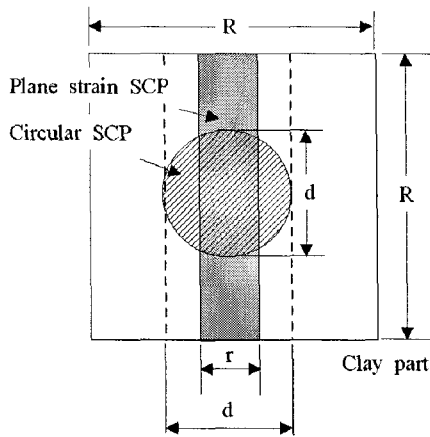


그림 1 환산등가단면의 결정

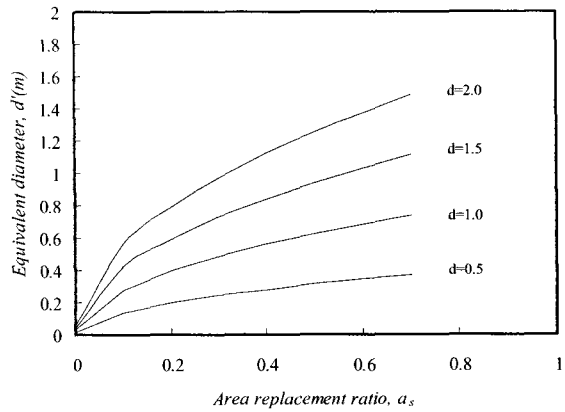


그림 2 치환율과 환산직경의 상관관계

그림 3(a)에는 일반적인 유한요소 해석조건에서 연직방향으로 상이한 재료가 혼재하는 경우 경계면에서의 응력 평형을 제시한 것이다. 즉, 초기 응력평형상태는 두 재료의 정지토압계수 K_0 에 의해 지배되며 이 초기응력 값을 기준으로 외력에 대한 반력을 계산하게 된다. 그러나 SCP 복합지반에 있어서는 상대적인 강성의 차이가 매우 큰 조밀한 모래와 점토지반이 연직방향으로 혼재하며, 상부 재하시 일반적으로 SCP의 거동은 별징에 이은 전단파괴 양상을 보이므로 SCP의 횡방향 팽창에 의해 주변 점토지반은 횡방향으로 압축거동을 하게 된다고 볼 수 있다. 따라서, 일반적인 해석 기법에서 적용되는 K_0 응력평형관계식을 그대로 이용하게 되면 SCP와 점토부에 작용하는 연직응력(σ_y) 산정이 실제 거동과 상이하게 되어 응력분담비 산정에 있어서는 신뢰성을 기할 수 없을 것이라고 판단되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 프로그램 FE-SCP에서는 복합지반 내에서 상대적으로 팽창성이 크고 연직응력을 크게 받는 SCP가 주변 점토지반에 더욱 큰 횡방향 응력이 작용할 것이라 가정하고, SCP에는 주동토압계수 K_a 를, 개량역역 내의 점토지반에는 수동토압계수 K_p 를, 무처리 점토지반에는 정지토압계수 K_0 를 각각 차별적으로 부여할 수 있도록 하였다.

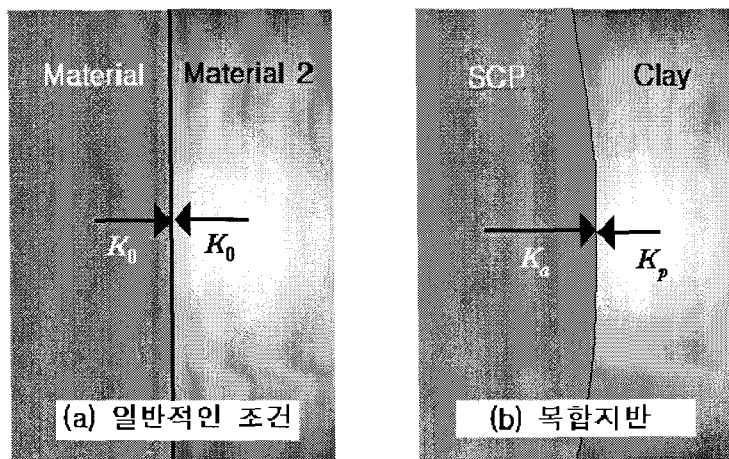


그림 3 응력평형조건

연직방향으로 상이한 재료가 혼재하는 해석의 경우에는 경계면에서 발생하는 변위의 불일치를 보정하는 과정에서 필연적인 오차가 발생하게 되므로 이를 최적화할 수 있는 방법은 이질 재료에 동일한 재료 특성을 부여하는 것이다. 실제로 복합지반 내에 존재하는 조밀한 모래말뚝은 점토의 구속에도 불구하고 변형률 연화에 근사한 거동을 보이는 것으로 알려졌다(신현영,2005) 이를 적절히 구현하기 위해서는 연화모델의 도입이 가장 최선의 방법이 된다. 그러나 현재까지 검증된 형태의 연화모델은 존재하지 않으며 더욱이 배수 조건에서 변형률 경화의 거동을 보이는 점토와 연화거동을 보이는 모래말뚝이 혼재하는 경우에는 경계면의 변위 불일치가 더욱 크게 발생할 수 있다. 한편 SCP 복합지반의 거동은 항복상태의 판단이 중요한 의미를 가지며, 점토부에 비해 SCP가 받는 응력수준이 더욱 커서 하중전이 파라미터에 지배적인 역할을 하기 때문에, 예비 검토과정을 통해 점토부와 SCP에 모두 Mohr-Coulomb 구성 모델을 적용하는 것이 최적의 조건임을 확인하였다. 탄소성 구성매트릭스의 전개는 매우 일반적인 사항이므로 생략하였고, Mohr-Coulomb 구성이론에 적용된 항복면의 방정식은 식(2)와 같다.

$$F = \frac{1}{3} I_1 \sin \phi' + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta \sin \phi'}{\sqrt{3}} \right) - c' \cos \phi' \quad (2)$$

한편, Mohr-Coulomb 파괴규준에는 간극수압의 항이 포함되어 있지 않아 압밀의 해석이 불가능하므로, 점토부에서의 간극수압 소산에 따른 압밀거동을 파악하기 위한 압밀 해석 알고리즘을 추가하였다.

3. 복합지반의 거동 해석

3.1 해석조건

프로그램의 적용성 검토를 위한 해석은 그림 4에 제시한 원심모형 시험 단면으로, 치환율 28.3%와 개량폭 2의 조건에 대해 상부 모래 마운드와 케이슨을 설치한 상태에서 50G의 중력가속도를 적용하고 2mm/min의 일정 변형률 속도로 케이슨 상부에서 재하하였다. 응력계는 도시한 바와 같이 모래말뚝과 점토의 상부와 하부에 매설하여 각각의 응력을 실측하였다. 원심모형시험기는 일본공영(주)에서 보유한 NK-시험기이다. 시험에 사용된 재료의 물성치와 해석단면의 형상은 표 1에 제시하였다. 수치해석에는 4절점-9적분점 사각형 요소를 사용하였다.

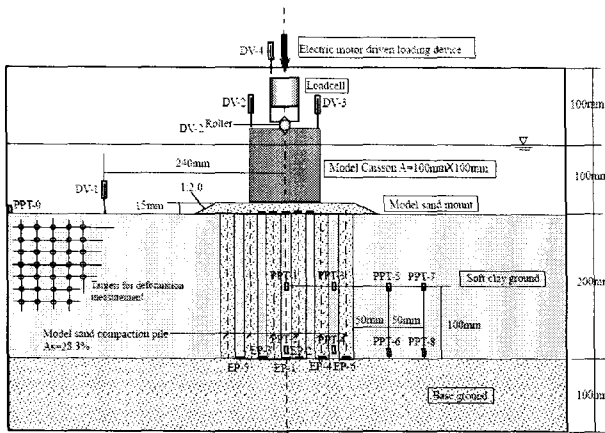


그림 4 해석단면

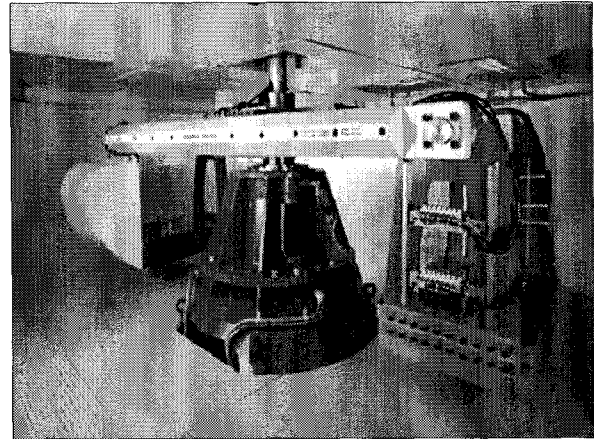


그림 5 NK 원심모형 시험기

표 1 해석대상지반의 물성치와 해석단면

조건	E_0 (kPa)	ν	c (kPa)	ϕ' ($^\circ$)	γ_t (kN/m ³)	k_x (cm/sec)	k_y (cm/sec)	해석단면(FE-SCP & CRISP 공통)
점토	3200	0.35	23.85	21.97	15.55	2e-7	1e-5	
SCP	14200	0.25	0	36.8	17.5	2e-5	1e-5	

3.2 해석결과

해석결과를 원심모형 시험데이터와 비교함과 동시에 범용 지반해석 프로그램인 Sage 사의 CRISP 프로그램의 해석결과와 함께 도시함으로써 프로그램 FE-SCP의 적용성을 분석하였다. 그림 6(a)는 복합지반 상부에 작용하는 응력에 대한 결과로서, 등변형률 조건에 대한 치환율-응력의 상관관계식인 $\sigma = \sigma_s a_s + \sigma_c (1 - a_s)$ 로부터 계산한 것이다. SCP와 점토부에 작용하는 응력은 재하 중앙하부 SCP 1개소와 점토부 1개소에서 값으로, 원심모형시험에서는 상부와 하부의 2 곳에서 측정된 응력의 평균값이고, CRISP과 FE-SCP를 이용한 해석의 경우에는 사각형 요소의 중앙 적분점에 대한 전체 평균값이다.

FE-SCP의 해석 결과는 원심모형시험 결과와 매우 잘 일치하고 있으며, CRISP 해석 결과는 응력수준을 다소 과다평가 하고 있기는 하지만 그 정도는 크지 않아 허용가능한 정도의 수준으로 판단할 수도 있다. 그러나, 복합지반의 하중전이 파라미터는 SCP와 점토부에 작용하는 각각의 응력에 대한 비에 해당하므로 이를 개별적으로 살펴볼 필요가 있다.

그림 6(b)와 그림 6(c)는 SCP와 점토부에 작용한 평균 응력의 변화를 도시한 것이다. FE-SCP를 이용한 해석은 SCP에 작용하는 초기 응력을 다소 과소평가하고는 있으나 변형률의 증가에 따라 근사하게

일치하였으나 CRISP의 해석결과는 항복응력을 초과하는 경우의 응력 수준을 매우 과다 평가하는 것으로 조사되었다. 반면 점토부에 작용하는 응력은 두 해석결과 모두 실험 데이터의 변화 경향과 비교적 근사한 일치를 보였다.

이러한 응력의 크기 차이는 모래말뚝의 응력집중계수($\mu_s = \sigma_s/\sigma$)와 점토부의 응력저감계수($\mu_c = \sigma_c/\sigma$)의 변화 경향에 영향을 미치게 된다. 그림 6(d)와 그림 6(e)는 이러한 결과를 도시한 것으로서, FE-SCP 해석결과는 CRISP 해석결과에 비해 μ_s 와 μ_c 를 보다 근사하게 예측하는 것으로 나타났다.

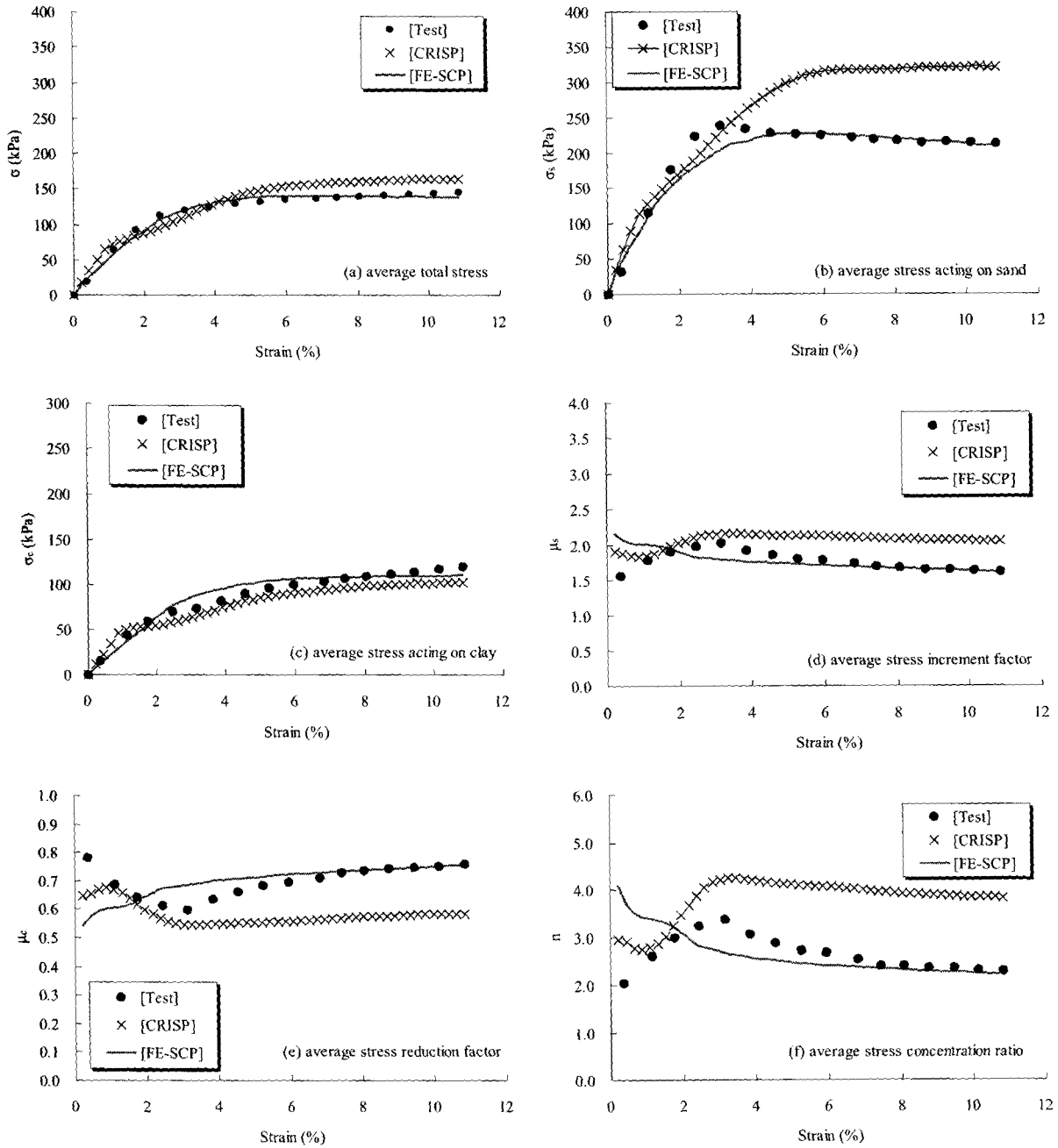


그림 6 해석결과와 시험결과의 비교

SCP 복합지반 설계에 있어서 궁극적으로 적용되는 응력분담비(n)의 변화를 그림 6(f)에 도시하였다. FE-SCP는 CRISP에 비해 전체적으로 계층 값에 더욱 양호한 일치를 보이고 있으며, 최종 값을 기준으로 비교하면 CRISP의 해석결과는 실험결과와 FE-SCP의 해석결과에 비해 대략 2 정도 높은 응력분담비를 예측하는 것을 알 수 있다. FE-SCP와 CRISP 해석에 있어서의 근본적인 차이는 토압계수의 적용에 있다. 즉, 모든 단면형상과 해석조건은 동일한 상태에서 CRISP은 점토부와 모래말뚝의 토압계수가 정지토압계수 K_0 의 형태로 일괄 적용되는 반면, 본 연구를 통해 개발한 FE-SCP는 횡방향 팽창성이 상대적으로 큰 모래말뚝에 의해 점토가 수동 상태로 거동할 것이라 가정하여 개량영역 내의 점토부에 수동토압계수 K_p , 모래말뚝에 대해 주동토압계수 K_a , 그리고 미개량 영역에 대해 정지토압계수 K_0 를 각각 적용하도록 개발되었으며, 이러한 가정에 의해 수치해석에 있어서 보다 양호한 결과를 얻었던 것으로 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 저치환율 SCP 공법이 적용된 지반의 거동 해석을 위한 전용 해석프로그램 FE-SCP를 개발하고 원심모형시험 결과 및 기존의 범용 유한요소 해석프로그램인 CRISP의 해석결과와의 비교를 통해 그 적용성을 검토하였다. 프로그램 FE-SCP는 Mohr-Coulomb 구성이론을 근거로 간극수압의 변화를 고려한 압밀해석이 가능하며, SCP 복합지반에 대한 최적 해석을 위해 SCP 환산직경의 적용과 자동요소분할, 그리고 토압계수의 차등 적용 등의 특징을 가지고 있다.

검토 결과 복합지반에 작용하는 평균응력은 FE-SCP와 CRISP 모두 실험 결과와 비교적 잘 일치하였으나, 점토부와 SCP에 각각 작용하는 응력에는 서로 차이가 존재하여 결과적으로 하중전이 파라미터인 모래말뚝의 응력집중계수 μ_s 와 점토부의 응력저감계수 μ_c , 응력분담비 n 등에 대해서는 FE-SCP의 해석 결과가 더욱 신뢰성을 갖는 것으로 나타났다. 이후 보다 폭넓은 현장 사례 및 실험결과와의 비교분석을 통해 프로그램의 적용성을 지속적으로 검토할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 (주)삼성물산 건설부문과 한양대학교의 공동 연구로 진행된 결과이며, 프로그램 개발은 (주)지구환경전문가그룹에서 담당하였습니다. 연구에 도움을 주신 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김수삼, 신현영, 한상재, 정승용 (2005) “저치환율 SCP 개량지반의 탄성계수 변화”, 대한토목학회논문집, 제25권, 제3C호, pp.165-170
2. 신현영(2005), “저치환율 SCP 복합지반의 거동 해석”, 중앙대학교 박사학위논문
3. 신현영, 한상재, 김수삼, 김재권 (2005, 11), “저치환율 SCP 보강 점토지반의 거동”, 대한토목학회논문집, 제25권, 제6C호, pp.369-378

4. 한상재, 신현영, 김수삼, 김재권 (2005) "저치환율 SCP 복합지반의 배수전단거동 분석", *대한토목학회논문집*, 제25권, 제3C호, pp.157-164
5. Desai, C. S. and Siriwardane, H. J. (1984) "Constitutive laws for engineering materials", *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, NJ, pp.468
6. Soo Sam Kim, Hyun Young Shin, Sang Jae Han, Jae Kown Kim (2005. 6), "Triaxial(CD) Behavior of SCP Composite Ground with Low Area Replacement Ratio", *The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition*
7. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. (1983) "Design and construction of stone columns", *Report No. FHWA/RD-83/026*, National Tech. Info. Service, Springfield, Virginia
8. Matsuo, M., Kuga, S. and Maekawa, Y. (1967) "Research on mechanical properties of clay installed sand pile", *JSCE*, No.141, pp.42-55 (in Japanese)
9. Yamagata, K. and Hukamoto, K. (1982) "Stress ratio of a sand pile and cohesive soil in composite ground", *The 17th Conf. of JSSMFE*, pp.2417-2419 (in Japanese)